بررسی ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصالات حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳*

بهروز رحمتیان [۱] سید احسان میرصالحی [۲] کامران دهقانی [۳]

چکیده

در این تحقیق، تأثیر متغیرهای اصلی بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر پرداخته شده است. همچنین در شرایط بهینه سرعت سیر و چرخش، تأثیر طول پین در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه مورد بررسی قرار گرفته است. در سرعت سیر ۸۰ mm/min افزایش سرعت چرخش تأثیری بر اندازهٔ دانه در ناحیهٔ اغتشاش ندارد. در این حالت دو عامل تبلور مجدد دینامیکی و حرارت ورودی ناشی از فرایند جوشکاری اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند؛ امّا در سرعت سیر ۴۰ $^{mm}/_{min}$، با افزایش سرعت چرخش ابزار، اثر حرارت ورودی غالب و این پدیده منجر به رشد دانه‌ها در ناحیهٔ اغتشاش شده است. همچنین با وجود کاهش حدوداً ده برابری اندازهٔ دانه‌ها در ناحیهٔ اغتشاش در مقایسه با فلز پایه، تغییری در مقدار سختی در ناحیهٔ اغتشاش مشاهده نگردید. بازده اتصال در بهترین شرایط اتصال به ترتیب در سرعت سیر و چرخش ۸۰ $^{mm}/_{min}$ و ۱۰۰۰ rpm و طول پین ٦ mm، برابر با ۹۹/٤ ٪ است. در این حالت ازدیاد طول ۹ ٪ در مقایسه با فلز پایه بهبود پیدا کرده است.

واژه‌های کلیدی جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه، آلیاژ آلومینیوم، طول پین، سرعت سیر، سرعت چرخش، ریزساختار، خواص مکانیکی.

Investigation of Metallurgical Structure and Mechanical Properties of Double-Sided Friction Stir Welded joint of AA5083 Plates

B. Rahmatian S. E. Mirsalehi K. Dehghani

Abstract

In this research, the effect of major welding parameters on microstructural evolutions and mechanical properties of double-sided friction stir welded thick 5083 aluminum alloy joints was investigated. For the traverse speed of 80 mm/min, the increase in the rotational speed does not have any effect on the average grain size. In this case, it can be said that the annealing grain growth and recrystallization effect counteract and neutralize each other. However, for the traverse speed of 40 mm/min, with increasing the rotational speed, the grain size increases due to the dominance of annealing grain growth effect. Grain size in the stir zone was decreased about ten time as compared with base metal; however, no considerable increase was observed in the hardness of the stir zone and the hardness profile remained almost uniform alongside the joint area. The best joint efficiency was equal to 99.4 % with the pin length of 6 mm and transverse and rotational speeds of 80 mm/min and 1000 rpm, respectively. Also, the elongation was improved about 9 % compared to the base metal.

Keywords Double-sided friction stir welding, Aluminum alloy, Pin length, Traverse speed, Rotational speed, Microstructure, Mechanical properties

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ و نسخهٔ پایانی آن در تاریخ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشجوی دکتری، دانشکدهٔ مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
(۲) نویسنده مسئول: دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
(۳) استاد، دانشکدهٔ مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Email: mirsalehi@aut.ac.ir

DOI:10.22067/ma.v31i1.66237

مقدّمه

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی، بازگشت‌پذیری (دوستدار محیط‌زیست) و هدایت حرارتی و الکتریکی بالا در صنایع مختلفی استفاده می‌شود [1]. آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردی که در محیط‌های شدید از خود نشان می‌دهد به‌طور گسترده‌ای در صنایع حمل‌ونقل به‌ویژه حمل‌ونقل دریایی و خودروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آلیاژ همچنین در مخازن تحت‌فشار، برج‌های مخابراتی، دکل حفاری، صفحات زرهی و اجزای موشک کاربرد دارد [2].

اتصال آلیاژ آلومینیوم توسّط فرایندهای جوشکاری ذوبی باعث ایجاد عیوبی همچون ترک انجمادی، آخال سرباره، تخلخل، حبس شدن گازها و جدایش در حین انجماد می‌شود [3]. علاوه بر این، بخار شدن منیزیم جزو مشکلات اصلی در جوشکاری ذوبی آلیاژهای سری ۵۰۰۰ است [4]. این عیوب باعث کاهش کیفیّت جوش و خواص اتصال می‌شود به‌نحوی‌که استحکام اتصال ایجاد شده بین ۵۰ الی ۷۰ درصد استحکام فلز پایه است [5].

مشکلات یادشده توسّط روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که در سال ۱۹۹۱ در موسسهٔ جوشکاری انگلستان ابداع شد تا حدّ زیادی بر طرف گردیده است [6]. در این روش اتصال مواد بدون هیچ ذوبی، توسّط ابزاری غیر مصرفی که شامل دو قسمت پین و شانه است برقرار می‌شود. حرارت اصطکاکی حاصل از چرخش پین و همچنین تماس شانه با فلز پایه باعث نرم‌تر شدن فلز پایه و درنتیجه راحت‌تر شدن عمل اغتشاش و درنهایت تغییر شکل پلاستیک فلز پایه می‌شود. روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی به‌طور وسیعی در صنایع هواپیمایی، کشتی‌سازی و ماشین‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است [7]. با وجود ویژگی‌های متعدّد و همچنین پیشرفت‌های چشمگیر در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی آلیاژهای آلومینیوم، این فرایند دارای معایبی نیز است. در اغلب موارد روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در یک سمت اتصال اعمال می‌شود. در این حالت ابزار ساخته شده تنها یک‌بار از فصل مشترک اتصال عبور می‌کند که این امر باعث عدم اغتشاش و جوش خوردن در سمت دیگر اتصال می‌شود که به عیب ریشه معروف است. این عیب باعث ضعیف‌تر شدن ناحیهٔ جوش می‌شود که دلیل اصلی شکست قطعات از ناحیهٔ اتصال در آزمون‌های کشش و خمش است [8-10]. همچنین هم‌زمانی چرخش و حرکت ابزار باعث می‌شود که حرارت تولیدی و سیلان مواد به‌صورت غیر یکسان باشد که این امر موجب تفاوت ریزساختار و خواص مکانیکی بین دو قسمت پیشرونده (AS) و پسرونده(RS) می‌شود [11-13]. علاوه بر این، در اتصال مواد با ضخامت‌های بالا، طول بلندتر پین و نیروی اعمالی بیشتر سبب شکست ابزار می‌شود [8,9]. تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که روش‌های چند پاسه [14] و دوچرخه معکوس [15] سبب بهبود خواص مکانیکی شده‌اند. اگرچه استفاده از روش‌های فوق یکنواختی کامل ریزساختاری در ناحیهٔ اغتشاش و همچنین شکل‌پذیری کافی برای اتصالات را ایجاد نمی‌کند [11,16]. به‌منظور رفع این مشکلات، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه در جهت بهبود استحکام، شکل‌پذیری و افزایش یکنواختی ناحیهٔ اغتشاش (Stir Zone) استفاده شده است [12,13,16]. حجازی و همکاران [17] تأثیر طول پین را در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه بر خواص مکانیکی اتصالات آلومینیوم ۶۰۶۱ با ضخامت ٤ میلی‌متر مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند، هنگامی‌که میزان همپوشانی در ناحیهٔ اغتشاش از دو طرف برابر با ۱۵ درصد باشد، بیشترین استحکام کششی حاصل می‌شود.

تاکنون تحقیقات زیادی در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی لب‌به‌لب آلومینیوم ۵۰۸۳ انجام شده است؛ امّا تاکنون تحقیقی در مورد جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه در ضخامت‌های بالا انجام نشده است. بیرول و همکاران [4] و هیراتا و همکاران [18] تأثیر سرعت ابزار و شکل پین را بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصالات آلومینیوم ۵۰۸۳ را بررسی نمودند. مائدا و همکاران [11] به بررسی تغییرات دمایی بین سمت پیشرونده و پسرونده در

اتصالات هم‌جنس و غیر هم‌جنس پرداختند. پیک [19] به بررسی خواص مکانیکی اتصالات لب‌به‌لب آلومینیوم ۵۰۸۳ توسّط دو روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی و جوشکاری قوسی با گاز محافظ (GMAW) پرداخت و به این نتیجه رسید که استفاده از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی منجر به بهبود خواص مکانیکی اتصال‌ها گردیده است. در این تحقیق، اتصال سربه‌سر ورق‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ و با ضخامت ۱۰mm توسّط فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه انجام شد. سرعت سیر، سرعت چرخش و طول پین بر روی ویژگی‌های ریزساختاری و خواص مکانیکی اتصالات بررسی شد. درنهایت در شرایط بهینه اتصال، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک‌طرفه انجام شده است.

مواد و روش تحقیق

ورق‌های مورد استفاده برای جوشکاری، از جنس آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به ضخامت ۱۰mm و ابعاد ۱۴۰mm×۶۰mm می‌باشند. ترکیب شیمیایی و خواص مکانیکی این آلیاژ به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده‌اند.

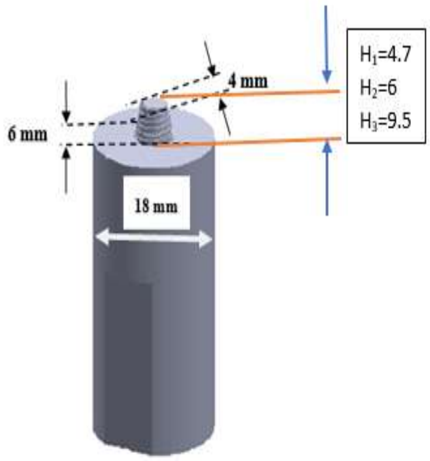
جدول (۱) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳

Mg	Cr	Mn	Cu	Fe	Si
۴/۳	۰/۱	۰/۸	۰/۱	۰/۲	۰/۱

جدول (۲) خواص مکانیکی آلیاژ ۵۰۸۳

سختی (HV)	افزایش طول (%)	استحکام کششی (MPa)	استحکام تسلیم (MPa)
۸۰	۲۶/۵	۳۲۲	۱۴۳

به منظور برقراری اتصال و بررسی ارتفاع پین از سه ابزار غیر مصرفی شامل شانه و پین استفاده گردید. شکل پین مورد استفاده در هر سه ابزار به صورت مخروط ناقص رزوه‌دار است (شکل ۱). از دو ابزار با طول‌های پین ۴/۷ و ۶ میلی‌متر در حالت دوطرفه و ابزاری با طول پین ۹/۵ mm برای جوشکاری یک‌طرفه مورد استفاده قرار گرفتند. هر سه ابزار مورد استفاده از جنس فولاد ابزار گرم‌کار (H13) و پس از انجام عملیات حرارتی بر روی آن‌ها به‌سختی ۵۰HRC رسیدند. به‌منظور بررسی تأثیر سرعت چرخش و سرعت سیر در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه و اهمیت بیشتر سرعت چرخش نسبت به‌سرعت سیر [20]، اتصالاتی توسّط ابزار با طول پین ۶ mm در سه سرعت چرخش ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه و دو سرعت سیر ۴۰ و ۸۰ $^{mm}/_{min}$ انجام گردید. سپس با توجّه به مشاهدات ریزساختاری و نتایج حاصل از آزمون کشش، سرعت سیر و چرخش بهینه انتخاب و درنهایت به‌منظور بررسی تأثیر طول پین روی خواص جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه و همچنین مقایسه با حالت جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک‌طرفه، به ترتیب دو اتصال توسّط ابزارهایی با طول پین‌های ۴/۷ و ۹/۵ میلی‌متر در شرایط بهینه انجام گردید. حالت‌های مختلف اتصالات ایجاد شده به‌طور خلاصه در جدول (۳) آورده شده است.



شکل (۱) شماتیکی از ابزار مورد استفاده با طول پین‌های مختلف استفاده شده در این تحقیق

به‌منظور راحتی در تحلیل نتایج، نمونه‌ها کدگذاری شده‌اند. کدهای نمونه از چهار بخش تشکیل شده‌اند: قسمت اوّل نحوهٔ فرایند جوشکاری را نشان می‌دهد. حرف D و S به ترتیب نشان‌دهندهٔ دوطرفه و یک‌طرفه بودن فرایند است. قسمت دوم نشان‌دهندهٔ سرعت چرخش ابزار

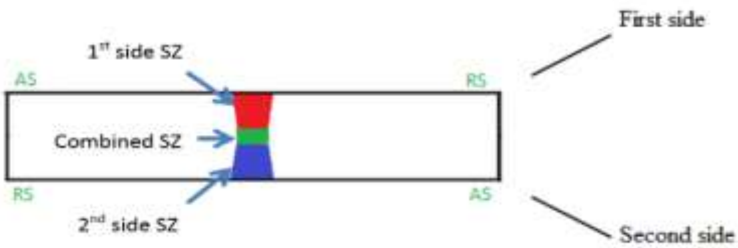
است که سرعت‌های ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب با حروف L، M و H نام‌گذاری شده‌اند. قسمت سوم مشخص‌کنندهٔ سرعت سیر ابزار است. قسمت چهارم، طول پین مورد استفاده را نشان می‌دهد.

در تمامی حالت‌ها ابزار نسبت به صفحه عمود بر صفحه ۳ درجه انحراف داشته و ابزار در خلاف جهت عقربه‌های ساعت می‌چرخد. در تمامی نمونه‌های جوشکاری شده دوطرفه، حرکت ابزار در دو سمت هم‌جهت می‌باشند (شکل ۲). در این حالت عدم تقارن در دو سمت پیشرونده و پسرونده برطرف شده و ناحیهٔ اتصال دارای یکنواختی بیشتری است و همچنین در این حالت خواص مکانیکی ایجاد شده نسبت به حالتی که جهت جوشکاری در دو طرف مخالف هم است بهتر می‌باشد [21]. به‌منظور مطالعات ریزساختاری، تمامی نمونه‌ها در جهت عمود بر جهت جوشکاری بریده شده و توسّط سمباده و پولیش صیقل داده شده و به‌منظور آشکارسازی ساختار نمونه‌ها از محلول پولتون با ترکیب شیمیایی ۱%HF، ۱/۵%HCl، ۱۰%HNO_3، ۸۷/۵%H_2O و محلول بارکر با ترکیب شیمیایی ۲/۵٪ اسید فلوبوریک استفاده گردید.

میانگین اندازهٔ دانه در تمامی نمونه‌ها و در مرکز آن‌ها توسّط نرم‌افزار کلمکس اندازهٔ گرفته شد. با توجّه با استاندارد ASTM E8 نمونه‌ها در جهت عمود بر مقطع عرضی توسّط دستگاه وایرکات آماده شدند. آزمون کشش در دمای محیط و با استفاده از دستگاه INSTRON 8502 انجام شد و سرعت حرکت فک‌ها برابر با ۱ mm/min قرار داده شد. همچنین سطح شکست نمونه‌های حاصل از آزمون کشش به‌منظور بررسی سطح شکست توسّط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفتند. علاوه بر این، آزمون میکروسختی برای دو نمونه که به ترتیب دارای بیشترین و کمتری حرارت ورودی می‌باشند در جهت عمود بر جهت جوشکاری و در میانه ضخامت تحت بار اعمالی ۵۰ gf انجام شد.

جدول (۳) سرعت‌های چرخش، سیر و ابزارهای مورد استفاده برای ایجاد اتصالات FSW

کد نمونه	D-L-40-6	D-L-80-6	D-M-40-6	D-M-80-6	D-H-40-6	D-H-80-6	D-M-80-4.7	S-M-80-9.5
سرعت چرخش (rpm)	۸۰۰	۸۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰
سرعت سیر (mm/min)	٤٠	٨٠	٤٠	٨٠	٤٠	٨٠	٨٠	٨٠
طول پین (mm)	٦	٦	٦	٦	٦	٦	٤/٧	٩/٥



شکل (۲) شماتیکی از فرایند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی
دوطرفه مورد استفاده در این تحقیق

نتایج و بحث

مشاهدات درشت ساختاری

انتخاب مناسب سرعت سیر و چرخش باعث می‌شود که با تولید یک حرارت ورودی کافی، انتقال فلز نیز به‌خوبی در ناحیهٔ اتصال صورت گیرد. با توجّه به تصاویر ناحیهٔ اتصال، هیچ‌گونه عیبی در آن‌ها مشاهده نمی‌شود، می‌توان نتیجه گرفت روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه و انتخاب پارامترهای جوشکاری بسیار مناسب هستند (شکل ۳). در هنگام جوشکاری با پین ۹/۵mm و به‌صورت یک‌طرفه در اثر افزایش حرارت و نیروی اعمالی، پین دچار شکست شد و درنتیجه می‌توان بر این نکته تأکید کرد که جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در ضخامت‌های بالا به‌صورت دوطرفه بهتر است. بسته به متغیرهای فرایند همچون هندسه ابزار، دمای قطعه‌کار و هدایت حرارتی ماده، ناحیهٔ اغتشاش اساساً به دو صورت کاسه‌ای شکل و بیضوی شکل تقسیم می‌شود [22]. تشکیل ناحیهٔ اغتشاش به‌صورت کاسه‌ای شکل مربوط به حرارت ناشی از اصطکاک بین با سطح قطعه‌کار و همچنین تغییر شکل شدید در ناحیهٔ اغتشاش است [4]. با توجّه به یکسان بودن هندسه ابزار و قطعه‌کار، ناحیهٔ اغتشاش کاسه‌ای شکل در تمامی نمونه‌ها مشاهده شد.

در هیچ‌کدام از حالت‌های جوشکاری خطوط بیضوی یا دایره‌ای شکل در ناحیهٔ اغتشاش که به حلقه‌های پیازی معروف هستند، که در اثر حکاکی این ناحیه پدیدار می‌شوند، مشاهده نمی‌شود. این حلقه‌ها در اثر تغییرات اندازهٔ دانه‌ها، بافت و چگالی نابجایی‌ها در ناحیهٔ اغتشاش شکل می‌گیرند. ازجمله عوامل تأثیرگذار در شکل‌گیری این حلقه‌ها می‌توان به هندسه ابزار، سرعت چرخش و سرعت سیر اشاره نمود [7]. گزارش شده است که این حلقه‌ها موجب تضعیف خواص مکانیکی ناحیهٔ اتصال می‌شود [4]. با مشاهده در تصاویر درشت‌ساختاری به‌خصوص شکل (۳-ی) که دو طرف اتصال همپوشانی با یکدیگر ندارند مشاهده می‌شود که ناحیهٔ اغتشاش نسبت به مرکز اتصال متقارن است و با حرکت از مرکز اتصال به سمت ناحیهٔ فلز پایه و در سمت پسرونده، ناحیهٔ اغتشاش کمرنگ می‌شود، درحالی‌که در سمت پیشرونده یک مرز مشخصی وجود دارد که این امر مرتبط با نرخ تغییر شکل و دمای کمتر در سمت RS نسبت به AS است [4,11]. امّا در حالت‌های دیگر با توجّه به همپوشانی دو سمت جوشکاری با یکدیگر مشاهده می‌شود که این تفاوت بین دو سمت ناحیهٔ اغتشاش ناچیز می‌شود.



شکل (۳) مقطع عرضی از ناحیهٔ جوش در سرعت‌های سیر و چرخش الف) D-L-40-6، ب) D-L-80-6، ج) D-M-40-6، د) D-M-80-6، ه) D-H-40-6، و) D-H-80-6 و ی) D-M-80-4.7

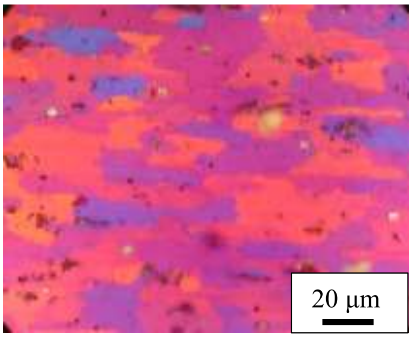
میزان گسترش ناحیهٔ اغتشاش از سمت دوم در جهت ضخامت و همچنین پهنای ناحیهٔ اغتشاش در حالت‌های مختلف در جدول (٤) آورده شده است. مشاهده شد که با افزایش حرارت ورودی، پهنای ناحیهٔ اغتشاش نیز بیشتر می‌شود و این افزایش متناسب با نسبت ω/v (حرارت ورودی) است. در نتیجه می‌توان گفت که اندازهٔ ناحیهٔ اغتشاش، شدیداً تحت تأثیر حرارت ورودی اعمالی است [23].

جدول (٤) مشخصات ناحیهٔ اغتشاش در حالت‌های مختلف اتصال

کد نمونه	D-L-40-6	D-L-80-6	D-M-40-6	D-M-80-6	D-H-40-6	D-H-80-6	D-M-80-4.7
میزان گسترش ناحیهٔ اغتشاش از سمت دوم در جهت ضخامت (μm)	٦٣٨٦	٦٣١٠	٦٤٣٦	٦٣٧٥	٦٤٠٨	٦٤٠٨	٤٩٤٠
ω/v	٢٠	١٠	٢٥	١٢/٥	٣٠	١٥	١٢/٥
پهنای ناحیهٔ اغتشاش در وسط قطعه (μm)	٨٣٤٨	٦١٩٦	٨٥٤٣	٦٦٦٣	٨٦٣٠	٧٠٠٠	٥٥٩٨

مشاهدات ریزساختاری

ریزساختار آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به‌صورت همگن و دارای دانه‌های کشیده شده در جهت نورد است که اندازهٔ متوسّط کشیدگی دانه‌های آن در حدود ۵۰μm است. شکل (٤) دانه‌های کشیده شده در جهت نورد فلز پایه را نشان می‌دهد.

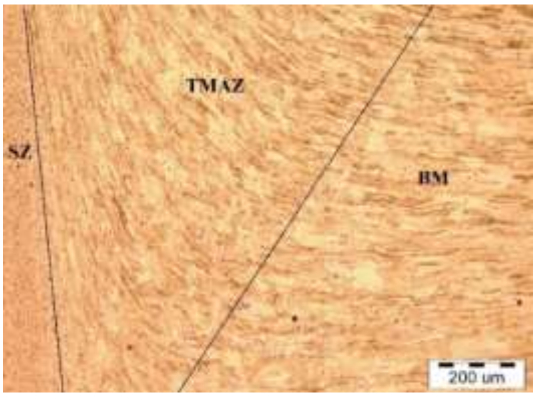


شکل (٤) ریزساختار اولیّه آلومینیوم ۵۰۸۳

اتصال ایجاد شده به‌وسیله جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی در آلیاژ آلمینیوم ۵۰۸۳ باعث تشکیل سه منطقه به نام‌های ناحیهٔ اغتشاش، ناحیهٔ متأثر از ترمومکانیکال و ناحیهٔ متأثر از حرارت می‌شود. شکل (٥) ناحیهٔ اغتشاش (SZ)، ناحیهٔ متأثر از ترمومکانیکال (TMAZ) و فلز پایه (BM) را نشان می‌دهد.

به‌منظور بررسی تأثیر سرعت سیر و سرعت چرخش بر ریز ساختار اتصالات جوشکاری شده، ریز ساختار ناحیهٔ اغتشاش (SZ) اتصالات بدیت آمده در شکل (٦) آورده شده است. به دلیل افزایش دما و تغییر شکل پلاستیک شدید، دانه های این ناحیهٔ تبدیل به دانه هایی ریز و هم‌محور می‌شوند [24].

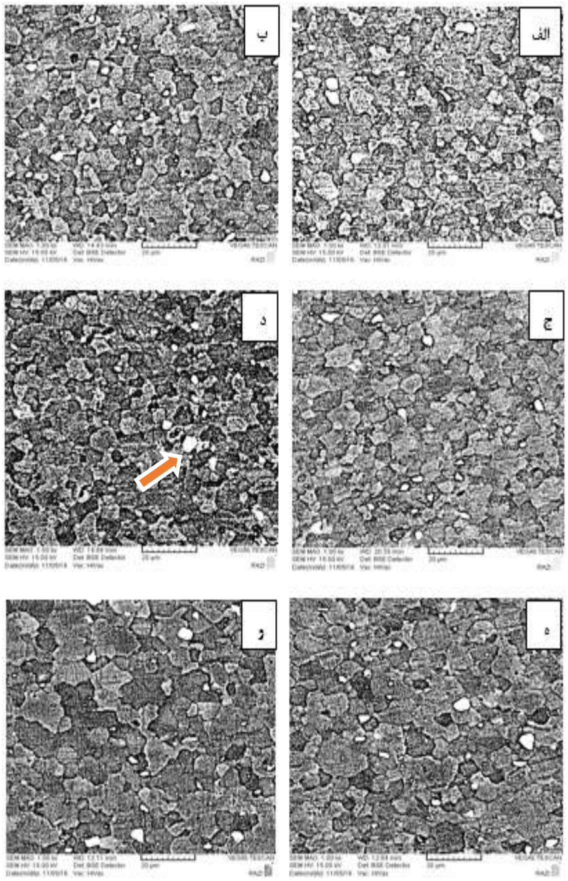
در آلومینیوم ۵۰۸۳، $Al_6(Mn,Fe)$ و Al_3Mg_2 به‌عنوان ذرّات بین فلزی و مقادیر کمی از رسوبات β-Mg_2Si وجود دارند که اغتشاش پین در ناحیهٔ SZ، سبب خرد شدن ذرّات درشت‌بین فلزی $Al_6(Mn,Fe)$ و همچنین حل شدن ذرّات Al_3Mg_2 و β-Mg_2Si می‌شود [4]. آنالیز EDS ذرّات سفید رنگ مشاهده شده در شکل (٦) نشان می‌دهد که عناصر اصلی این ذرّات Al، Mn و Fe هستند. شکل (٧) آنالیز عنصری از ذره مشخص شده در شکل (٦-د) را نشان می‌دهد.



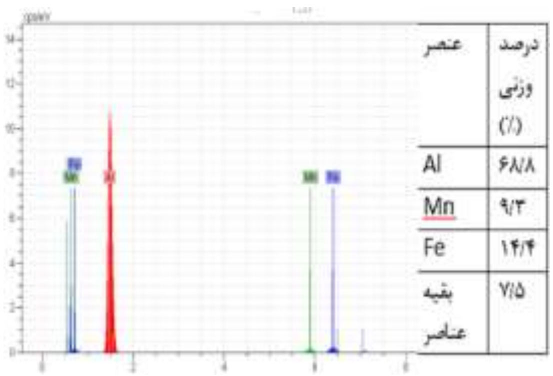
شکل (٥) نواحی ایجاد شده در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی

شکل (٨) تأثیر سرعت سیر و چرخش را را بر روی میانگین اندازهٔ دانه نمونه‌های جوشکاری شده را در مرکز اتصال نشان می‌دهد. دو عامل اصلی که بر روی اندازهٔ دانه در ناحیهٔ اغتشاش تأثیرگذار هستند عبارت‌اند از: ١) اغتشاش پین سبب تبلور مجدد دینامیکی می‌شود که این امر باعث کاهش اندازهٔ دانه می‌شود. ٢) حرارت ورودی ناشی از جوشکاری که سبب آنیل شدن و درنتیجه افزایش اندازهٔ دانه می‌شود [22]. با افزایش سرعت سیر، ماده تنش مکانیکی شدیدی را تحمل می‌کند و شدیداً تحت تأثیر تبلور مجدد

دینامیکی قرار می‌گیرد که درنتیجه باعث افزایش محل‌های جوانه‌زنی و کاهش اندازهٔ دانه می‌شود.

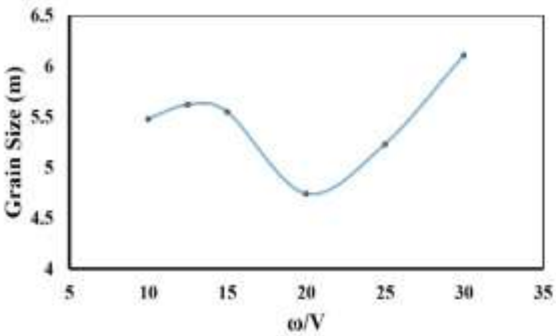


شکل (۶) تصویر SEM از ریزساختار ناحیهٔ اغتشاش در سرعت‌های سیر و چرخش الف) D-L-40-6، ب) D-L-80-6، ج) D-M-40-6، د) D-M-80-6، ه) D-H-40-6 و) D-H-80-6



شکل (۷) آنالیز EDS از ذره مشخص شده در شکل (۶ د)

با کاهش حرارت ورودی در اثر افزایش سرعت سیر، تأثیر آنیل شدن کاهش می‌یابد و درنتیجه از رشد دانه جلوگیری می‌شود. با افزایش سرعت چرخش و درنتیجه تشدید تأثیر اغتشاش، تغییر شکل ماده بیشتر می‌شود که این امر موجب کاهش اندازهٔ دانه می‌شود [25]. از طرفی دیگر این افزایش در سرعت چرخش سبب افزایش حرارت ورودی و رشد دانه می‌شود [5]. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود در سرعت سیر ۸۰ mm/min، افزایش سرعت چرخش تأثیری بر روی میانگین اندازهٔ دانه ندارد. در این حالت می‌توان گفت که دو عامل متضادی که در فوق ذکر شد و سبب تغییر اندازهٔ دانه می‌شوند اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند؛ امّا در سرعت سیر ۴۰ $^{mm}/_{min}$، با افزایش سرعت چرخش، میانگین اندازهٔ دانه‌ها به دلیل افزایش حرارت ورودی و درنتیجه تأثیر آنیل، افزایش می‌یابند. همچنین در سرعت‌های چرخش ۸۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه، مشاهده می‌شود که با وجود افزایش سرعت سیر از ۴۰ به ۸۰ $^{mm}/_{min}$ و درنتیجه کاهش حرارت ورودی، اندازهٔ دانه افزایش یافته است. این به دلیل تأثیر بیشتر تبلور مجدد مکانیکی نسبت به حرارت ورودی است. در سرعت چرخش ۱۲۰۰ دور بر دقیقه، مشاهده می‌شود که با کاهش سرعت سیر، تأثیر حرارت ورودی بیشتر از تبلور مجدد دینامیکی است و درنتیجه، اندازهٔ دانه با کاهش سرعت سیر افزایش یافته است.

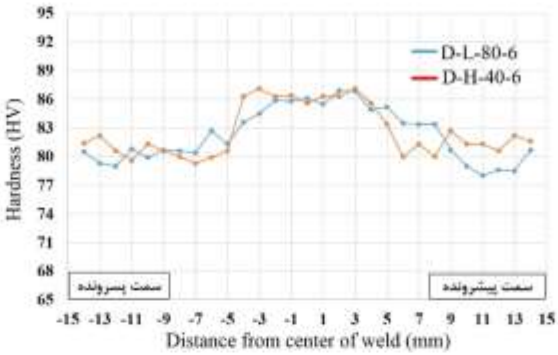


شکل (۸) تغییرات متوسّط اندازهٔ دانه در مرکز ناحیهٔ اغتشاش در سرعت‌های متفاوت چرخش و سیر توسّط ابزار با طول پین ۶ mm

خواص مکانیکی سختی

شکل (۹) پروفیل سختی در دو نمونه D-L-80-6 و D-H-40-6 که به ترتیب دارای کمترین و بیشترین حرارت ورودی است را نشان می‌دهد. عواملی همچون اندازهٔ دانه، چگالی نابه‌جایی‌ها، ذرّات بین فلزی و تأثیر آنیل (حرارت ورودی) بر روی مقدار سختی تأثیرگذارند. با توجّه به اینکه در اثر تشکیل ناحیهٔ اغتشاش ریزساختار اولیّه تغییر شکل یافته در ماده کار سرد شده از بین می‌رود، می‌توان گفت که مقدار سختی در ناحیهٔ اغتشاش مستقل از مقدار و نوع تمپر اولیّه آلومینیوم ۵۰۸۳ است [25,26]. در این تحقیق مقدار سختی در ناحیهٔ اغتشاش در مقایسه با سایر نواحی به مقدار کمی بیشتر است امّا به‌طورکلی می‌توان گفت که روند تغییرات سختی بین فلز پایه و ناحیهٔ جوش ثابت است که این نتیجه مشابه با سایر تحقیقات است [4,7,26,27]. علاوه بر این سختی در دو سمت ناحیهٔ اغتشاش روند یکسانی را طی می‌کند.

با توجّه به معادله هال–پچ، در اثر کاهش شدید اندازهٔ دانه که در ناحیهٔ اغتشاش رخ می‌دهد، مقدار سختی می‌بایستی به‌طور چشمگیری افزایش یابد [3]؛ امّا افزایش دما و درنتیجه آنیل شدن ماده در ناحیهٔ اغتشاش، منجر به کاهش چگالی نابجایی‌ها و همچنین تنش‌های فشاری باقی‌مانده ناشی از ورق نورد شده آلومینیوم ۵۰۸۳ شده و از افزایش سختی جلوگیری می‌کند [24,28]. ساتو و همکاران نتیجه گرفتند که پروفیل سختی در ناحیهٔ اغتشاش آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳، در اثر توزیع یکنواخت ذرّات ریز در ناحیهٔ جوش که معروف به مکانیزم اوراوان است، کنترل می‌شود و اندازهٔ دانه نقشی اساسی در تعیین مقدار سختی ندارد [26]. می‌توان گفت که این مقدار افزایش سختی در ناحیهٔ اغتشاش در مقایسه با سایر نواحی به دلیل خرد شدن ذرّات بین فلزی و همچنین پخش شدن آن‌ها به‌صورت همگن در ناحیهٔ اغتشاش است. با توجّه به یکنواختی تغییرات سختی در هر دو نمونه، می‌توان گفت که ناحیهٔ متأثر از حرارت در اتصال آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ وجود ندارد. این نتیجه مطابق با گزارش بیرول و همکارانش بوده است [4].



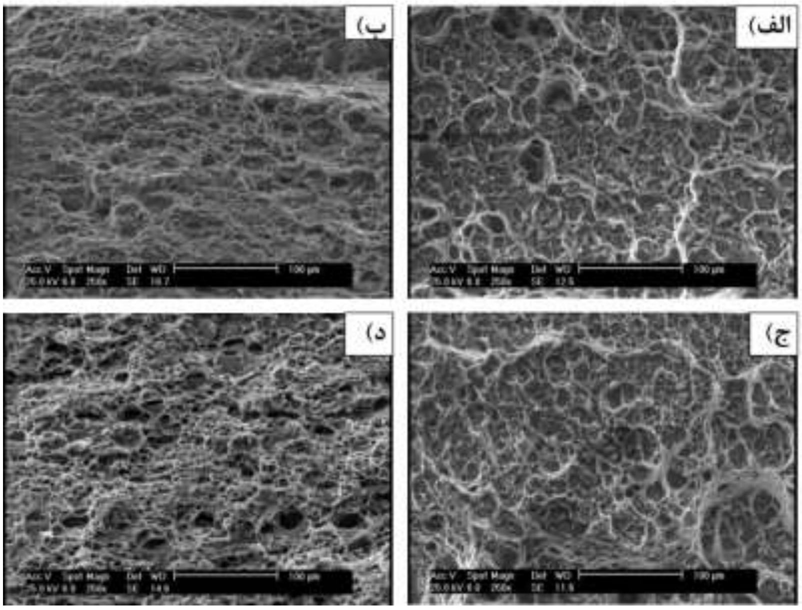
شکل (۹) پروفیل ریزسختی برای نمونه‌های D-L-80-6 و D-H-40-6

آزمون کشش

استحکام کششی، ازدیاد طول، انرژی شکست (سطح زیر نمودار تنش–کرنش)، سمتی که شکست در آن رخ‌داده و همچنین بازده اتصال (حاصل تقسیم استحکام کششی نمونه بر استحکام فلز پایه) در جدول (۵) آورده شده است. مورفولوژی سطح شکست (شکل ۱۰) و همچنین نحوه شکست که به‌صورت برشی است (شکل ۱۱) تأییدی بر شکست نرم در تمامی نمونه‌ها است. تمامی نمونه‌ها تقریباً دارای استحکامی برابر با فلز پایه دارند و سه نمونه D-L-80-6 و D-M-40-6 و D-M-80-6 دارای ازدیاد طول و انرژی شکست بیشتری در مقایسه با فلز پایه می‌باشند. کاهش تنش‌های پسماند ناشی از نورد فلز پایه و همچنین ریز شدن دانه‌ها در ناحیهٔ اغتشاش را می‌توان از جمله عوامل مهم در این امر ذکر کرد. کمترین بازدهی اتصال (۹٦,۷٪)، ازدیاد طول و انرژی شکست مربوط به نمونه M-80-4.7 است که در مقایسه با اتصال‌های به‌دست‌آمده با پینی به طول (mm) ٦ ضعیف‌تر است. درنتیجه می‌توان گفت که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه، مقداری همپوشانی در دو طرف اتصال سبب بهبود بیشتر خواص مکانیکی می‌شود. کاهش تنش‌های پسماند ناشی از نورد فلز پایه و همچنین ریز شدن دانه‌ها در ناحیهٔ اغتشاش نیز در این بهبود خواص مکانیکی مؤثر هستند.

جدول (۵) خواص مکانیکی اتصالات FSW در حالت‌های مختلف جوشکاری

کد نمونه	D-L-40-6	D-L-80-6	D-M-40-6	D-M-80-6	D-H-40-6	D-H-80-6	D-M-80-4.7
استحکام کششی (MPa)	۳۱۴/٤	۳۱۸/۹	۳۱۷/٦	۳۲۰/۳	۳۱۵/٦	۳۲۱/٦	۳۱۱/٥
ازدیاد طول (٪)	۲٤/۸	۲۷/۷	۲۸/۱	۲۸/۹	۲٥/۱	۲٦/۳	۲۳/۷
انرژی شکست (J)	٦۲۷۱	۷۳۷۲	۷٤۲۰	۷٦۹٦	٦٤۹٥	٦۹۱٤	٥٦۹۹
سمت شکست با توجّه به پاس دوم	AS	RS	RS	RS	AS	RS	RS
بازده اتصال (٪)	۹۷/٦	۹۹	۹۸/٦	۹۹/٤	۹۸	۹۹/۸	۹٦/۷

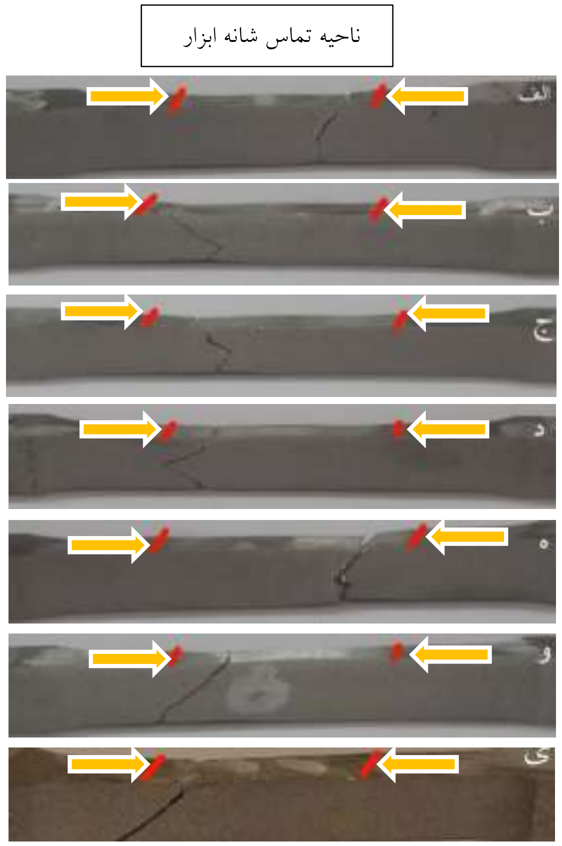


شکل (۱۰) تصویر SEM از سطح شکست حاصل از نمونه‌های آزمون کشش
الف) D-M-40-6، ب) D-M-80-6، ج) D-H-40-6، د) فلز پایه

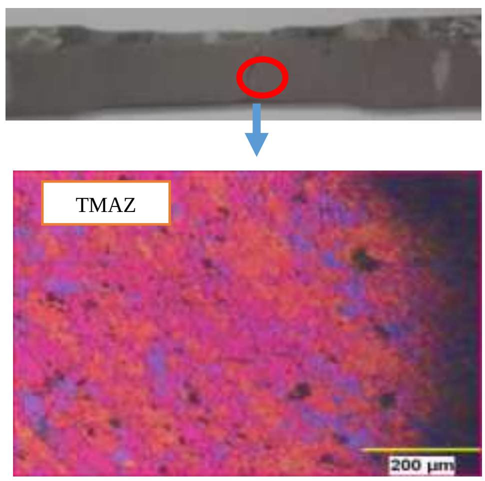
در صورت وجود حفره در ناحیهٔ اتصال، خواص مکانیکی و محل شکست به‌شدت تحت تأثیر این عیوب است. حفرات معمولاً در مرکز اتصال رخ می‌دهند و باعث کاهش خواص کششی اتصالات و همچنین شکست اتصالات در قسمت مرکز جوش می‌شوند. لمبارد و همکاران [23] نتیجه گرفتند که شبه باندها که در اثر سیلان پلاستیک در ناحیهٔ TMAZ ایجاد می‌شوند، باعث کاهش استحکام کششی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ می‌شود. اگرچه این عیب در مقطع شکست هیچ‌کدام از اتصال‌ها مشاهده نگردید. همچنین بازده اتصال به‌دست‌آمده نیز تأیید کننده این موضوع است.

محل شکست در تمامی اتصالات از مرز و یا نزدیک به مرز ناحیهٔ اغتشاش و TMAZ می‌گذرد که می‌توان گفت جوانه‌زنی ترک احتمالاً در این ناحیهٔ رخ داده است. شکل (۱۲) ریزساختار ناحیهٔ شکست و دانه‌های کشیده شده به سمت بالا که مشخصه ناحیهٔ TMAZ است را نشان می‌دهد. در اثر جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی، تغییر شکلی که در ناحیهٔ TMAZ اتفاق می‌افتد در مقایسه با تبلور مجدد دینامیکی بسیار بیشتر است؛ درنتیجه در هنگام آزمون کشش، تجمع نابجایی‌ها در این ناحیهٔ بسیار سریع‌تر نسبت به فلز پایه رخ می‌دهد. این امر موجب می‌شود که تنش اعمالی در

آزمون کشش تا رسیدن به سطح لازم برای جوانه‌زنی ترک، در این ناحیهٔ تمرکز کند [3].



شکل (۱۱) محل شکست نمونه‌های آزمون کشش الف) D-L-40-6، ب) D-L-80-6، ج) D-M-40-6، د) D-M-80-6، ه) D-H-40-6، و) -D-H-80 6، ی) D-M-80-4.7



شکل (۱۲) ریزساختار محل شکست در نمونه D-L-40-6

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه برای ایجاد اتصالات سربه‌سر آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ به ضخامت ۱۰ میلی‌متر در سرعت‌های سیر و چرخش مختلف و همچنین با دو طول پین ٤/٧ mm و ٦ انجام شد. همچنین به‌منظور مقایسه با جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی یک‌طرفه، اتصالی با طول پین ۹/۵ mm انجام شد که در حین اتصال به دلیل حرارت ورودی و نیروی اعمالی بالا، پین شکسته شد. تأثیر سرعت سیر و چرخش بر روی خواص مکانیکی و ریزساختار اتصالات حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه با طول پین ٦ mm مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در بهترین حالت فوق، به‌منظور بررسی تأثیر طول پین، اتصالی با طول پین ٤/٧ mm انجام شد. نتایج حاصل به‌صورت خلاصه در زیر آورده شده است:

۱. در هیچ‌کدام از اتصالات حاصل از جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه، در محل اتصال عیبی مشاهده نگردید.

۲. اندازهٔ ناحیهٔ اغتشاش شدیداً تحت تأثیر حرارت ورودی اعمالی است. با افزایش حرارت ورودی پهنای ناحیهٔ اغتشاش متناسب با نسبت $\frac{\omega}{v}$ (حرارت ورودی) افزایش می‌یابد.

۳. روند تغییرات سختی بین فلز پایه و ناحیهٔ جوش نشان می‌دهد که مقدار سختی در ناحیهٔ اغتشاش مستقل از اندازهٔ دانه است و توسّط رابطه هال–پچ توجیه نمی‌شود.

٤. کمترین بازدهی اتصال، ازدیاد طول و انرژی شکست مربوط به نمونه D-M-80-4.7 است که در مقایسه با اتصال‌های به‌دست‌آمده با طول پین ٦ mm ضعیف‌تر است. درنتیجه می‌توان گفت که در جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی دوطرفه، مقداری همپوشانی در دو طرف اتصال سبب بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

۵. بهترین شرایط اتصال مربوط به نمونه D-M-80-6 است که بازده اتصالی معادل ٪۹۹/٤ است. همچنین در این نمونه میزان ازدیاد طول در مقایسه با فلز پایه، ۹ درصد

بهبود پیدا کرده است. کاهش تنش‌های پسماند ناشی از نورد فلز پایه و همچنین ریز شدن دانه‌ها در ناحیهٔ اغتشاش را می‌توان از جمله عوامل مهم در این امر ذکر کرد.

مراجع

1. SALEHI, M., SAADATMAND, M., and AGHAZADEH MOHANDESI, J., "Optimization of process parameters for producing AA6061/SiC nanocomposites by friction stir processing", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 22, pp. 1055–1063, (2012).
2. Birol, Y., "Evolution of grain structure across joints in friction stir welded EN AW 5083 H111 plates during thermal exposure", *Materials Science and Technology*, Vol. 29, pp. 1283–1289, (2013).
3. Bahrami, M., Dehghani, K., and Besharati Givi, M. K., "A novel approach to develop aluminum matrix nano-composite employing friction stir welding technique", *Materials & Design*, Vol. 53, pp. 217–225, (2014).
4. Birol, Y. and Kasman, S., "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded EN AW 5083 H111 plates", *Materials Science and Technology*, Vol. 29, pp. 1354–1362, (2013).
5. Mohammadzadeh Jamalian, H., Farahani, M., Besharati Givi, M. K. et al., "Study on the effects of friction stir welding process parameters on the microstructure and mechanical properties of 5086-H34 aluminum welded joints", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 83, pp. 611–621, (2016).
6. W. M. Thomas, E. D. Nicholas, J. C. Needham, M. G. Murch, Friction Stir Butt Welding, (1991).
7. Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R. et al., "Friction stir welding of aluminium alloys", *International Materials Reviews*, Vol. 54, pp. 49–93, (2013).
8. Gopi, S. and Manonmani, K., "Predicting tensile strength of double side friction stir welded 6082-T6 aluminium alloy", *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 17, pp. 601–607, (2013).
9. Threadgill, P. L., Ahmed, M., Martin, J. P. et al., "The Use of Bobbin Tools for Friction Stir Welding of Aluminium Alloys", *Materials Science Forum*, Vol. 638, pp. 1179–1184, (2010).
10. Chen, X.-G., da Silva, M., Gougeon, P. et al., "Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6063–B4C metal matrix composites", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 518, pp. 174–184, (2009).
11. Maeda, M., Liu, H., Fujii, H. et al., "Temperature field in the vicinity of FSW-tool during friction stir welding of aluminium alloys", *Welding in the World*, Vol. 49, pp. 69–75, (2005).
12. Cabibbo, M., Forcellese, A., El Mehtedi, M. et al., "Double side friction stir welding of AA6082 sheets: Microstructure and nanoindentation characterization", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 590, pp. 209–217, (2014).
13. Rao, D., Huber, K., Heerens, J. et al., "Asymmetric mechanical properties and tensile behaviour prediction of aluminium alloy 5083 friction stir welding joints", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 565, pp. 44–50, (2013).
14. Brown, R., Tang, W., and Reynolds, A. P., "Multi-pass friction stir welding in alloy 7050-T7451: Effects on

weld response variables and on weld properties", *Materials Science and Engineering: A*, 513-514, pp. 115–121, (2009).

15. Li, J. Q. and Liu, H. J., "Characteristics of the reverse dual-rotation friction stir welding conducted on 2219-T6 aluminum alloy", *Materials & Design*, Vol. 45, pp. 148–154, (2013).
16. Thomas, W. M., Im Norris, Staines, D. G. et al., "Friction stir welding—process developments and variant techniques", *The SME Summit*, Vol. 1, pp. 1–21, (2005).
17. Hejazi, I. and Mirsalehi, S. E., "Effect of pin penetration depth on double-sided friction stir welded joints of AA6061-T913 alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 26, pp. 676–683, (2016).
18. Hirata, T., Oguri, T., Hagino, H. et al., "Influence of friction stir welding parameters on grain size and formability in 5083 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 456, pp. 344–349, (2007).
19. Paik, J. K., "Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum Alloys 5083 and 5383", *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol. 1, (2009).
20. Vijayan, S., Raju, R., and Rao, K., SR, "Multiobjective optimization of friction stir welding process parameters on aluminum alloy AA 5083 using Taguchi-based grey relation analysis", *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 25, pp. 1206–1212, (2010).
21. Kumar, A. R., Varghese, S., and Sivapragash, M., "A Comparative Study of the Mechanical Properties of Single and Double Sided Friction Stir Welded Aluminium Joints", *Procedia Engineering*, Vol. 38, pp. 3951–3961, (2012).
22. Mishra, R. S. and Ma, Z. Y., "Friction stir welding and processing", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, Vol. 50, pp. 1–78, (2005).
23. H. Lombard, D.G. Hattingh, A. Steuwer, M.N. James, "Optimising FSW process parameters to minimise defects and maximise fatigue life in 5083-H321 aluminium alloy", *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 341–354, (2008).
24. Zohoor, M., Besharati Givi, M. K., and Salami, P., "Effect of processing parameters on fabrication of Al–Mg/Cu composites via friction stir processing", *Materials & Design*, Vol. 39, pp. 358–365, (2012).
25. Barmouz, M., Givi, M. K. B., and Seyfi, J., "On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior", *Materials characterization*, Vol. 62, pp. 108–117, (2011).
26. Sato, Y. S., Park, S. H. C., and Kokawa, H., "Microstructural factors governing hardness in friction-stir welds of solid-solution-hardened Al alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 32, pp. 3033–3042, (2001).
27. Shigematsu, I., Kwon, Y.-J., Suzuki, K. et al., "Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding", *Journal of materials science letters*, Vol. 22, pp. 353–356, (2003).
28. Dolatkhah, A., Golbabaei, P., Givi, M. B. et al., "Investigating effects of process parameters on microstructural and mechanical properties of Al5052/SiC metal matrix composite fabricated via friction stir processing", *Materials & Design*, Vol. 37, pp. 458–464, (2012).